

Efecto de la adición de caliza sobre el metal depositado por arco sumergido

Amado Cruz-Crespo
Rafael Quintana-Puchol
Lorenzo Perdomo-González
Carlos R. Gómez-Pérez
Eduardo Díaz-Cedré
Jorge García-Jacomino
Félix Ariel Morales-Rodríguez

Resumen

Se evaluó el efecto del incremento de las adiciones de caliza en la obtención de un fundente al manganeso sobre la composición del metal depositado por arco sumergido (proceso SAW). La adición de caliza se realizó manteniendo constante la relación porcentual MnO/SiO_2 del sistema de óxidos del fundente. Con el aumento de la basicidad se logró intensificar la actividad termodinámica del MnO y disminuir la del SiO_2 , favoreciéndose la transferencia del manganeso al metal depositado, a la vez que se atenúa la del silicio, el azufre, el fósforo y el carbono permanece prácticamente inalterable. Esto posibilita el empleo de un alambre de bajo manganeso durante la soldadura de aceros de baja aleación con proceso SAW.

Palabras clave

Fundentes al manganeso; basicidad; soldadura por arco sumergido.

Effects of limestone addition on the composition of the metal deposited by submerged arc welding

Abstract

This work presents an evaluation of the effects of increasing limestone additions in obtaining a manganese flux on the composition of the weld metal deposited by submerged arc welding. The limestone was added maintaining the MnO/SiO ratio of the flux oxide system constant. As a result of an increase in basicity the thermodynamic activity of the MnO increased while that of the SiO₂ decreased, contributing to the transfer of Mn to the deposited metal and reducing the transfer of silicon, sulphur, phosphorus and carbon remain basically invariable. With this, it is possible to use a wire with low manganese content during submerged arc welding of low alloy steels

Keywords

Manganese flux; basicity; submerged arc welding.

1. INTRODUCCIÓN

La composición química del sistema fundente es tomada con frecuencia como punto de partida para evaluar el comportamiento del metal depositado por soldadura, e incluso, para predecir las propiedades de este. Algunos autores relacionan la composición química del fundente con las propiedades del mismo (Natalie *et al.* 1986; Paniagua-Mercado *et al.* 2003; Shao-Hua *et al.* 2006); otros la vinculan con la composición del depósito, la microestructura y las propiedades mecánicas (Paniagua-Mercado *et al.* 2005, 2008; Kanjilal & Majumdar 2006; Kanjilal *et al.* 2007).

Por otra parte, Quintana y Castellanos plantean que para obtener relativamente altos valores de manganeso en el cordón, en el sistema alambre-fundente la composición química del alambre debe aportar el mayor contenido de manganeso en el depósito. Si se espera una composición de la aleación del cordón, sin altos contenidos de este elemento, es suficiente el aporte del fundente fundido del sistema SiO₂-MnO a causa de la reducción del MnO (Castellanos & Quintana 1994; Quintana *et al.* 1998). La reducción ocurre fundamentalmente por el Fe(l) involucrado en el sistema (T ≥ 3000 K, ΔGFeO < ΔGMnO) y también por la presión parcial del Fe(g) (P_{Fe} ≈ 0,2 atm) en la gota y en la zona central del baño (Indocochea *et al.* 1985; Castellanos & Quintana 1994).

Algunos investigadores (Natalie *et al.* 1986; Paniagua-Mercado *et al.* 2003; Kanjilal *et al.* 2007) han activado el MnO a partir del aumento de la basicidad, desde el enfoque de la sustitución parcial del MnO por el MgO, con base en el criterio de la mayor polarizabilidad del catión Mg²⁺ en el óxido ($P = q^+ / R_{Me}^{n+}$, $R_{Mg}^{2+} < R_{Mn}^{2+}$; P- Polarización, C/Å, R_{Meⁿ⁺}- Radio Iónico Å, q+ - Carga Iónica, C). Sin embargo, la disminución del contenido de MnO en el fundente por disminución del valor de la relación MnO/SiO₂, aunque aumente el índice de basicidad por adición de MgO, no conduce a incrementos apreciables en la actividad química del MnO, ni a la disminución de la del SiO₂.

En cambio, si se adiciona E²⁺O²⁻ (CaO por ejemplo) para MnO/SiO₂ constante, se propicia la formación de silicatos más estables ($\Delta G_{Ca_x(SiO_{3;4})_y} < \Delta G_{Mn_x(SiO_{3;4})_y}$, lo que conduce al aumento de la actividad química del MnO y a la disminución de la del SiO₂, lo cual se refleja en la transferencia de los elementos químicos al baño de soldadura. Esto constituye el objetivo de la presente investigación y puede ser de utilidad para lograr depósitos de igual contenido

de manganeso utilizando un alambre menos costoso y de mayor disponibilidad.

En los fundentes al manganeso, cuando los contenidos de CaO son cercanos al 20 %, los de MnO resultan también próximos al 20 % (Podgayeskii & Kuzmienko 1988; Potapov 1989) y se adicionan otros óxidos, como el TiO_2 , que actúan como correctores del sistema, pero encarecen el sistema de óxidos del fundente; en tales casos este se ubica en la región de la pseudowolastonita en el diagrama ternario MnO-SiO₂-CaO (Figura 1).

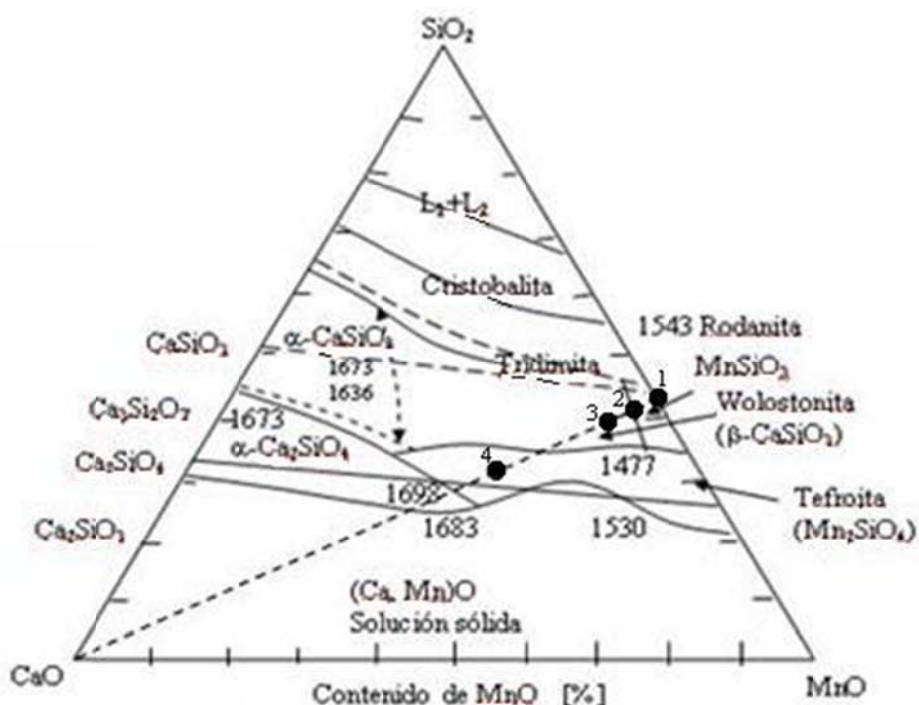


Figura 1. Diagrama de equilibrio del sistema ternario MnO- SiO₂- CaO.

1. Punto hipotético del sistema binario con relación $\text{MnO}/\text{SiO}_2=1,42$ ($\text{MnO}:\text{SiO}_2:\text{CaO}=58,68:41,32:0$ %); 2. Fundente FFMN1 ($\text{MnO}:\text{SiO}_2:\text{CaO}=56,92:40,0:3,08$ %) (Cruz-Crespo *et al.* 2006; Cruz-Crespo *et al.* 2007a); 3. Punto No 1 de la Tabla 1 ($\text{MnO}:\text{SiO}_2:\text{CaO}=55,67:39,17:5,16$ %); 4. Punto No 8 de la Tabla 1 ($\text{MnO}:\text{SiO}_2:\text{CaO}=46,90:33,02:20,08$ %). Los números de cuatro dígitos representan la temperatura en grados Celsius.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Composición del sistema de óxidos de los fundentes

Con el propósito de variar las condiciones de transferencia de elementos químicos al baño metálico, con una relación $\text{MnO}/\text{SiO}_2=1,42$

en el sistema de óxidos, se realizó un estudio de variación del índice de actividad química relativa del fundente en función del contenido de CaO en este, para un comportamiento con proceso SAW en combinación con un alambre de bajo manganeso (EL12), equivalente al obtenido con el sistema FFMN-EM12K y reportado por los autores del presente trabajo (Cruz-Crespo *et al.* 2006; Cruz-Crespo *et al.* 2007a).

Para ello, el contenido de CaO se incrementó a razón de un 2 % a partir de la composición media del fundente FFMN1 (Cruz-Crespo *et al.* 2006; Cruz-Crespo *et al.* 2007a), con relación R (MnO/SiO_2)=1,42. Mediante adiciones sucesivas de CaO y el reajuste de la relación porcentual del resto de los óxidos se obtuvo una serie de fundentes (Tabla 1).

Tabla 1. Contenido (en %) de los compuestos en los fundentes que se obtienen por adiciones sucesivas de CaO para una relación MnO/SiO_2 constante

Nº	MnO	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	CaF ₂	R(MnO/SiO ₂)
FFMN1	51,64	36,28	2,70	2,55	6,81	1,42
1	50,74	35,70	4,70	2,25	6,61	1,42
2	49,68	34,95	6,70	2,20	6,47	1,42
3	48,62	34,20	8,70	2,15	6,33	1,42
4	47,55	33,45	10,70	2,11	6,19	1,42
5	46,49	32,70	12,70	2,06	6,05	1,42
6	45,42	31,95	14,70	2,01	5,92	1,42
7	44,36	31,20	16,70	1,96	5,78	1,42
8	43,68	30,76	18,70	1,26	5,60	1,42

El incremento de CaO se realizó de manera que en el sistema de óxidos mayoritario (Figura 1), ocurre un desplazamiento hacia el área de la tefroita (Mn_2SiO_4) sobre la línea recta (CaO-Zona de $MnSiO_3$), en la dirección del vértice del CaO. Ello no afecta las condiciones de fusibilidad para la síntesis del fundente de acuerdo con el rango de las isotermas de esta región que atraviesa la recta, lo cual es, además, favorecido por la presencia de alrededor de un 6-7 % de CaF₂ en la composición (Shao-Hua *et al.* 2006). Así, la ubicación en el área de la tefroita para contenidos de CaO cercanos al 20 %, constituye un aspecto no reportado en la composición de los fundentes de alto manganeso.

2.2. Obtención de los fundentes

Para la obtención de los fundentes que respondieran a los contenidos de óxidos mostrados en la Tabla 1 se prepararon mezclas minerales de pirolusita, arena de sílice, caliza, feldespato y fluorita. Las proporciones específicas de cada mineral en la mezcla responde al

contenido requerido de cada uno de los componentes en el fundente y está en función, además, de la composición química de los minerales de carga (Cruz-Crespo *et al.* 2006; Cruz-Crespo *et al.* 2007a).

Los minerales mezclados tienen distinta procedencia, la pirolusita es del yacimiento Margarita de Cambute de la región oriental de Cuba; la arena de sílice, de Casilda en la región central de Cuba; la caliza, del yacimiento Palenque en la región central de Cuba y el feldespato, del yacimiento Tasajera de la región central; la fluorita es importada.

Los fundentes fueron obtenidos por procesamiento electrotérmico en horno de arco con crisol de grafito (Figura 2) para una mezcla mineral total de 4 kg, realizando el vertido en agua para la granulación y vitrificación.

A cada uno de los fundentes obtenidos se determinó la composición química media, por Fluorescencia de Rayos X, y sobre la base de esta se determinaron los valores de los índices de actividad química relativa y de basicidades de los fundentes (A_F), así como los índices de las actividades químicas relativas (A_{MnO} y A_{SiO_2}), y de actividades termodinámicas del MnO y del SiO_2 (a_{MnO} y a_{SiO_2}). Para ello se utilizaron las fórmulas (1), (2), (3) y (4) (Indocochea *et al.* 1985; Stukalo 1987; Podgayeskii & Kuzmienko 1988; Baune *et al.* 2000b, 2000b). Los contenidos de los óxidos se expresan en por ciento.



Figura 2. Horno de arco eléctrico vertiendo el fundente fundido.

$$B = \frac{0,018CaO + 0,025MgO + 0,006CaF_2 + 0,014(Na_2O + K_2O) + 0,007(MnO + FeO)}{0,017SiO_2 + 0,005(Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2)}, \quad (1)$$

$$A_f = \frac{(SiO_2) + 0,5(TiO_2) + 0,4(Al_2O_3 + ZrO_2) + 0,42 B^2 (MnO)}{100 B}, \quad (2)$$

$$a_{SiO_2} = 0,018 + 0,52A_{SiO_2}, \quad (3)$$

$$a_{MnO} = 0,0036 + 0,143A_{MnO}, \quad (4)$$

Donde: $A_{SiO_2} = (SiO_2)_F / (100B)$ y $A_{MnO} = 0,42(MnO)_F / 100$ - Índices de Actividades químicas relativas del SiO_2 y el MnO en el fundente.

2.3. Obtención de los depósitos de soldadura

Con cada uno de los fundentes se obtuvo depósitos de soldadura con proceso SAW. Para atenuar la dilución se realizaron cinco cordones superpuestos en probetas de acero de bajo carbono con alambre EL12 de 2 mm, utilizando las siguientes condiciones de régimen: corriente de soldadura, $I_s = 280$ A; tensión del arco, $U_a = 30-32$ V; velocidad de soldadura, $V_s = 42$ m/h, polaridad invertida y altura de capa de fundente de 25 mm. A los depósitos obtenidos se le determinó la composición química media mediante el análisis químico por vía húmeda.

Con el objetivo de tener criterios de comparación más acertados en relación al fundente FFMN1, ya homologado con la clasificación F7P0-EM12K de la AWS (Cruz-Crespo 2006 & Cruz-Crespo *et al.* 2007a), al fundente del punto 8 de la Tabla 2 se le realizó un proceso similar de homologación en combinación con el alambre EL12, siguiendo las indicaciones de la Norma AWS A5.17 (1998). Se obtuvo el cupón de prueba, se le realizó el control radiográfico y se extrajo la probeta para el ensayo de tracción como lo establece la Norma. La probeta fue ensayada en una máquina IBERTES.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las Tablas 2, 3 y 4 y en la Figura 3 se aprecia que el contenido de manganeso en el metal de soldadura aumenta con el incremento del CaO en el fundente (al crecer el índice de basicidad), mientras que los otros elementos tienden a disminuir, siendo los valores de manganeso obtenidos con los fundentes 7 y 8 los de resultados más próximos a los obtenidos con el fundente FFMN1-EM12K y OK Flux 1040-EM12K (Tabla 4).

Los resultados del ensayo de tracción del metal del cupón de prueba obtenido con el fundente del punto 8 y alambre EL12 (Tabla 5) son también similares a los obtenidos con el sistema alambre fundente FFMN1-EM12K.

Lo anterior deja claro que con alambre EL12, el fundente (en lo adelante FFMN1A) con relación porcentual $MnO/SiO_2=1,42$ para responder como homólogo de un fundente de alta sílice y alto manganeso, con electrodo EM12K, debe tener en su composición química valores de CaO entre 16,70 y 18,70 %, si solo se consideran sus cinco compuestos mayoritarios de acuerdo con la Tabla 1, cuyas composiciones se enmarcan en los rangos siguientes: MnO (43,68-44,36 %); SiO_2 (30,76-31,2 %); CaO (16,70-18,70 %); Al_2O_3 (1,26-1,96 %) y CaF_2 (5,60-5,78 %).

Tabla 2. Composición química media (en %) de los fundentes obtenidos experimentalmente

Nº	MnO	SiO_2	CaO	Al_2O_3	CaF_2	MgO	$Na_2O + K_2O$	TiO_2	FeO	P	MnO/SiO_2
1	49,22	34,65	4,56	2,40	6,41	0,52	0,69	0,14	1,19	0,086	1,42
2	48,16	33,91	6,50	2,36	6,27	0,58	0,70	0,14	1,17	0,084	1,42
3	47,15	33,21	8,44	2,31	6,14	0,59	0,67	0,14	1,15	0,082	1,419
4	46,12	32,5	10,38	2,28	6,01	0,59	0,66	0,13	1,13	0,080	1,419
5	45,08	31,77	12,33	2,23	5,87	0,65	0,64	0,13	1,11	0,078	1,418
6	44,06	31,07	14,26	2,19	5,74	0,63	0,63	0,13	1,09	0,077	1,418
7	43,04	30,36	16,20	2,15	5,61	0,64	0,61	0,12	1,07	0,076	1,418
8	42,46	29,95	17,76	2,05	5,36	0,63	0,60	0,12	1,01	0,057	1,418

Tabla 3. Índices de basicidad, de actividad química relativa de los fundentes experimentales y de actividad química relativa y termodinámica de los óxidos MnO y SiO_2

Nº	B	A_F	A_{MnO}	A_{SiO_2}	a_{MnO}	a_{SiO_2}
1	0,82	0,60	0,17	0,42	0,028	0,237
2	0,89	0,56	0,18	0,38	0,029	0,216
3	0,96	0,55	0,19	0,35	0,031	0,199
4	1,02	0,53	0,20	0,32	0,032	0,183
5	1,10	0,51	0,21	0,29	0,033	0,169
6	1,17	0,49	0,22	0,27	0,035	0,156
7	1,25	0,48	0,23	0,24	0,036	0,144
8	1,32	0,46	0,23	0,23	0,036	0,136

El hecho de que el sistema alambre-fundente (FFMN1A-EL12) haya revelado resultados satisfactorios en cuanto a composición y resistencia mecánica, en comparación con el sistema FFMN1-EM12K, abre la posibilidad de ahorrar mineral de manganeso, el cual es de alto precio, ya que este fundente presenta en su contenido menos MnO (el FFMN1 contiene 50,6-53,0 % de MnO (Cruz-Crespo *et al.* 2006 & Cruz-Crespo *et al.* 2007a) y el FFMN1A contiene 43,68-44,36 %. Al mismo tiempo se sustituye un alambre de medio manganeso (EM12K) por uno de bajo manganeso (EL12), lo que también significa una disminución del costo, al tratarse de un alambre menos aleado.

Tabla 4. Composición química media del metal de soldadura depositado con los fundentes experimentales

Nº	C (%)	Mn, (%)	Si (%)	P (%)	S (%)
0*	0,08	0,70	0,10	0,016	0,012
1	0,08	0,78	0,10	0,016	0,012
2	0,08	0,82	0,09	0,015	0,012
3	0,08	0,89	0,09	0,015	0,011
4	0,07	0,93	0,09	0,015	0,011
5	0,07	1,04	0,08	0,013	0,009
6	0,07	1,16	0,08	0,013	0,008
7	0,07	1,20	0,07	0,012	0,008
8	0,07	1,21	0,07	0,011	0,005

* Este punto experimental corresponde a los resultados con el fundente FFMN1 y alambre EL12.

Tabla 5. Resultados del ensayo de tracción del metal del cupón de prueba

Tensión Máxima, MPa	Tensión de Fluencia, MPa	Elongación Relativa, %
508	417	29,5

El aumento del contenido de manganeso en el metal de soldadura con el aumento de la basicidad (Tablas 2, 3 y 4; Figura 3) está vinculado con el aumento de la interacción del MnO (A_{MnO} , a_{MnO}) al aumentar el

CaO, pues al aumentar la basicidad por adición de CaO, que forma en presencia de SiO₂ silicatos más estables que los que forma el MnO ($\Delta G_{Ca_x(SiO_{3;4})_y} < (\Delta G_{Mn_x(SiO_{3;4})_y})$), queda este último menos enlazado en el fundido, lo cual equivale a aumentar su concentración en la frontera interfase metal-escoria, según la ecuación (1), tomada de la literatura (Indocochea *et al.* 1985; Castellanos & Quintana 1994; Quintana *et al.* 1998).

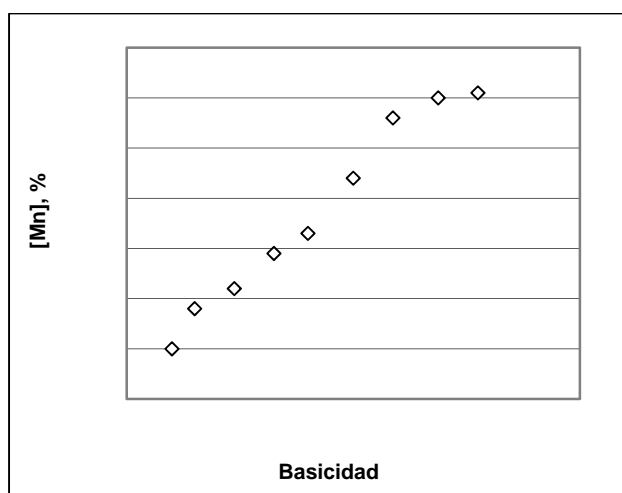
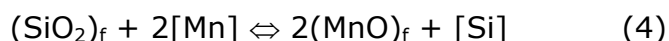
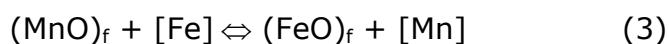


Figura 3. Variación del contenido de manganeso en el metal depositado en función de la basicidad del fundente.

Para el silicio (Tabla 2, 3, 4; Figura 4) ocurre todo lo contrario, el aumento de la basicidad trae consigo la formación de compuestos más estables con el SiO₂, lo que equivale a una disminución de la actividad del SiO₂ en la frontera interfase.

Los procesos de oxidación-reducción del silicio y el manganeso bajo fundentes son abordados por varios autores (Indocochea *et al.* 1985; Castellanos & Quintana 1994; Quintana *et al.* 1998) y responden a las ecuaciones siguientes:



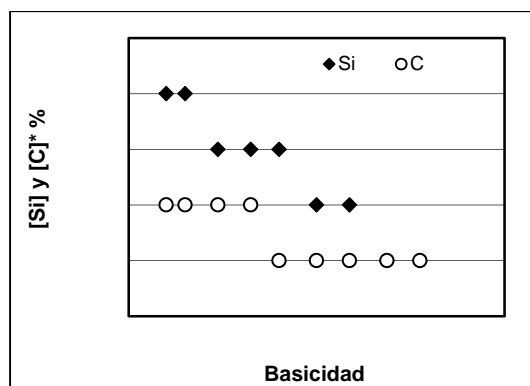


Figura 4. Variación del contenido de carbono y de silicio en el metal depositado en función de la basicidad del fundente.

El monóxido de hierro (wustita) se disuelve en la escoria y parcialmente en el metal líquido, quedando como resultado de las ecuaciones descritas el metal enriquecido al mismo tiempo con silicio, manganeso y oxígeno. Según Quintana *et al.* (1998), la reducción del óxido de manganeso por el hierro ocurre en el estadio de gota y zona de incidencia del arco y la reducción del silicio puede comenzar a temperaturas algo inferiores en la zona del baño, a la vez que de manera paralela se puede verificar la reacción (4) de oxidación-reducción del silicio y el manganeso.

Cabe señalar que Quintana *et al.* (1998) abordan un sistema silicático de muy bajos contenidos de MnO, donde se considera que el proceso por arco sumergido ocurre en el seno de una burbuja delimitada por una película de escoria fundida, infundiéndosele al sistema un efecto de presión positiva.

En el presente trabajo, los altos contenidos de MnO modifican el comportamiento del sistema de óxidos. Sobre el contenido de silicio en la composición final del metal de soldadura (Tabla 4 y Figura 4) hay una concurrencia con el manganeso que puede ser interpretada por las ecuaciones (1) a la (4).

El reforzamiento de la actividad termodinámica del MnO (Tabla 3 y ecuación (1)) equivale al aumento de la concentración de este óxido que desplaza el equilibrio de la reacción (4) hacia la izquierda, en tanto que en la (3) lo desplaza hacia la derecha. Lo anterior redundaría en que la transferencia del manganeso al metal de soldadura se favorece y la del silicio se limita. Es importante que en el análisis se tome en consideración que en el baño de soldadura se interrumpe el equilibrio termodinámico a causa de las altas velocidades de enfriamiento,

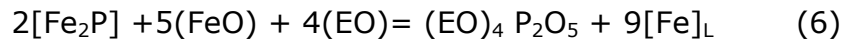
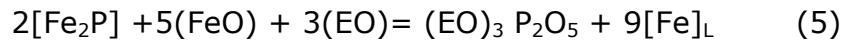
verificándose los procesos de manera parcial y quedando en consecuencia el metal con una composición media, dada por las diferentes zonas de temperatura del baño. La propia cinética de las reacciones se modifica con el descenso de la temperatura durante el enfriamiento del baño.

La influencia de la basicidad del fundente (contenido de CaO) sobre el carbono en el metal de soldadura prácticamente no se manifiesta, como se advierte en las Tablas 2, 3 y 4 y Figura 4. Esto está ligado a los fenómenos de oxidación-reducción del silicio y el manganeso abordados arriba (ecuaciones 2 a la 4), que hacen que el carbono ocupe en todo momento un lugar secundario como desoxidante.

Un comportamiento similar del carbono frente a la basicidad fue observado en un trabajo previo, en el cual la relación MnO/SiO_2 fue variada (Cruz-Crespo *et al.* 2007b). Esto está asociado a lo planteado arriba acerca de la disminución de la actividad química del SiO_2 con el aumento de la basicidad (Tabla 3), pues una menor actividad del SiO_2 en el sistema con alto MnO significa que este último es liberado al formarse Ca_2SiO_4 basado en la reacción (1), reduciéndose hasta [Mn] por la reacción (3) con la formación de FeO que parcialmente pasa al metal líquido y pudiendo oxidarse el [C].

El aumento de CaO en el sistema (aumento de la basicidad) ha condicionado la disminución del contenido de fósforo en el metal de soldadura (Tablas 2, 3 y 4 y Figura 5). Tal tendencia del fósforo frente a la basicidad es coincidente con lo que clásicamente refleja la literatura (Potapov 1989; Podgayeskii & Kuzmienko 1988) y coincide con resultados previos de los autores (Cruz-Crespo *et al.* 2007b). En las referidas investigaciones se ha trabajado con relaciones MnO/SiO_2 variables, por lo que el efecto del CaO no ha sido evaluado de manera independiente.

Para el fósforo, en el metal de soldadura la influencia de la basicidad del sistema de óxidos es claramente reflejado de modo general en las ecuaciones (5) y (6). De las ecuaciones anteriores y de la ecuación (1) se infiere un doble efecto del CaO, de una parte actúa directamente como óxido básico, según las ecuaciones (5) y (6) y de otra refuerza la actividad del MnO (según la ecuación (1) y los datos de la Tabla 3) que puede actuar también como óxido básico en las ecuaciones (5) y (6).



Donde: EO- óxidos básicos

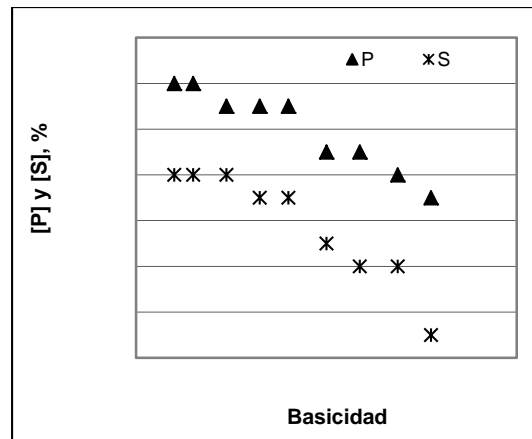
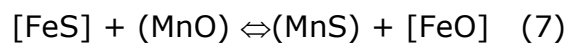


Figura 5. Variación del contenido de fósforo y de azufre en el metal depositado en función de la basicidad del fundente.

El azufre también disminuyó en el metal de soldadura con el aumento de la basicidad del fundente, como se advierte en las Tablas 2, 3 y 4 y Figura 5. Este elemento, como se refleja en las ecuaciones (7) y (8), recibe un efecto de carácter dual, pues el CaO y otros compuestos básicos no solo influyen sobre el azufre directamente disminuyendo su contenido en el baño (ecuación (8)), sino que aumentan la actividad del MnO (ecuación (1) y Tabla 3) el cual, según la ecuación (7), disminuye el contenido de azufre, considerándose un desulfurante fuerte (Potapov 1989; Podgayeskii & Kuzmienko 1988).



4. CONCLUSIONES

El aumento, hasta aproximadamente 20 %, del CaO en el sistema ternario, para un valor constante de $\text{MnO}/\text{SiO}_2=1,42$, logrado por la adición de caliza en la mezcla mineral, conduce a la región de la tefroita, lo cual no afecta las condiciones de fusibilidad del sistema, de acuerdo con las isoterms de esta región. Tal ubicación en el sistema ternario es un aspecto novedoso para fundentes de altos contenidos de

SiO₂ y MnO que generalmente se ubican en la región de la pseudowalastonita.

El aumento de CaO para condiciones invariantes de relación MnO/SiO₂=1.42 aumenta el contenido de manganeso en el metal de soldadura y disminuye los contenidos de silicio, carbono, fósforo y azufre, a la vez que el carbono permanece prácticamente invariable, ya que aumenta la actividad del MnO y disminuye la del SiO₂ en el sistema, favoreciéndose consecuentemente la reducción del MnO y limitándose la del SiO₂.

Para elevados contenidos de CaO, con una relación MnO/SiO₂=1,42, el fundente FFMN1A cumple los siguientes requerimientos de composición de sus compuestos principales: MnO (43,68-44,36 %); SiO₂ (30,76-31,2 %); CaO (16,70-18,70 %); Al₂O₃ (1,26-1,96 %) y CaF₂ (5,60-5,78 %).

Este fundente en el proceso SAW, en combinación con el electrodo EL12, se comporta, en cuanto a composición del metal de soldadura y resistencia del metal depositado, de manera similar al fundente FFMN1 con electrodo EM12K.

La combinación de fundente de elevado contenido de CaO y relación MnO/SiO₂=1,42 con electrodo EL12 posibilita disminuir los costos de producción del fundente, al disminuir el MnO (disminuye el consumo de pirolusita en la producción del fundente) y al utilizar un alambre de bajo manganeso (EL12) en la soldadura, el cual, al ser menos aleado es más barato que un alambre electrodo de medio manganeso (EM12K).

5. REFERENCIAS

- AWS A5.17. 1998: Specification for carbon steel electrodes and fluxes for submerged arc welding.
- BAUNE, E.; BONNET, C. & LIU, S. 2000a: Reconsidering the basicity of a FCAW Consumable-Part 1: Solidified Slag Composition of a FCAW Consumable as a Basicity Indicator. *Welding Journal* (3): 57-65.
- BAUNE, E.; BONNET, C. & LIU, S. 2000b: Reconsidering the basicity of a FCAW Consumable-Part 2: Verification of the Flux/Slag Analysis Methodology for Weld Metal Oxygen Control. *Welding Journal* (3): 66-71.
- CASTELLANO, G. & QUINTANA, P. R. 1994: Consideraciones sobre el coeficiente de transferencia. *Construcción de Maquinaria* (2).
- CRUZ-CRESPO, A.; QUINTANA, P. R.; PERDOMO, L. & GOMEZ, C. 2006: Obtención por Fusión de un Fundente para la Soldadura por Arco Sumergido del Sistema MnO-SiO₂-CaO-Al₂O₃-CaF₂. *Soldagem Insp.* 11(2).

- CRUZ-CRESPO, A.; QUINTANA, P. R.; PERDOMO, L. & GOMEZ, C. 2007a: Obtaining a Submerged arc Welding Flux of the MnO-SiO₂-CaO-Al₂O₃-CaF₂ System by Fusion. *Welding International* (7): 502-511. Disponible en: DOI: 10.1080/0950711070159746
- CRUZ-CRESPO, A.; QUINTANA, P. R.; PERDOMO, L. & GOMEZ, C. 2007b: Estudio de los vínculos de la composición de un fundente fundido con su estructura y propiedades. *Soldagem Insp.* 12(4): 305-315.
- INDACOCHEA, E. J.; BLANDER, M.; CHRISTERSEN, N. & OLSON, D. L. 1985: Chemical reactions during submerged arc welding with FeO-MnO-SiO₂ fluxes. *Metallurgical and Material Transactions* 16(2).
- KANJILAL, P.; PAL, T. K. & MAJUMDAR, S. K. 2006: Combined effect of flux and welding parameters on chemical composition and mechanical properties of submerged arc weld metal. *Journal of Materials Processing Technology* 171(2): 223-231. Disponible en: doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.06.083
- KANJILAL, P.; PAL, T. K. & MAJUMDAR, S. K. 2007: Prediction of mechanical properties in submerged arc weld metal of C-Mn steel. *Materials and Manufacturing Processes* 22(1-2): 114-127.
- NATALIE, C. A.; OLSON, D. L. & BLANDER, M. 1986: Physical and Chemical Behavior of Welding Fluxes. *Annual Review of Materials Science* 16: 389-413. Disponible en: doi:10.1146/annurev.ms.16.080186.002133.
- PANIAGUA-MERCADO, A. M.; ESTRADA-DIAZ, P. & LOPEZ-HIRATA, V. M. 2003: Chemical and structural characterization of the crystalline phases in agglomerated fluxes for submerged-arc welding. *Journal of Materials Processing Technology Volume* 141(1): 93-100. Disponible en: doi:10.1016/S0924-0136(03)00155-9
- PANIAGUA-MERCADO, A. M.; LOPEZ-HIRATA, V. M. & SAUCEDO M. L. 2005: Influence of the chemical composition of flux on the microstructure and tensile properties of submerged-arc welds. *Journal of Materials Processing Technology* 169(3): 346-351. Disponible en: doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.03.035
- PANIAGUA-MERCADO, A. M.; LOPEZ-HIRATA, V. M.; DORANTES, H. J.; ESTRADA, P. & DIAZ, E. 2008: Effect of TiO₂-containing fluxes on the mechanical properties and microstructure in submerged-arc weld steels. *Materials Characterization*. Disponible en: doi:10.1016/j.matchar.2008.06.003
- PODGAYESKII, V. & KUZMIENKO, G. 1988: Teoría de las escorias. Ed. Naukova Dumka, Kiev, 255 p.
- POTAPOV, N. N. 1989: Materiales para soldar. Gases protectores y fundentes Tomo 1. Ed. Mashinoestroyeniya, Moscú, 544 p.
- QUINTANA, P. R.; CASTELLANOS, G.; PERDOMO, L.; CRUZ-CRESPO, A. & GOMEZ, C. 1998: Algunas consideraciones sobre la influencia de la constitución matricial de los fundentes cerámicos y la composición química del metal depositado mediante la soldadura automática bajo fundente. *Minería y Geología* XV(2): 69-74.

- SHAO-HUA, S.; WEI-WEI, C.; ZHI-QIANG, L.; TIAN-GE, S. & AN, Z. 2006: Effect of Submerged Arc Welding Flux Component on Softening Temperatura. *Journal of Iron and Steel Research, International* 13(2): 65-68. Disponible en: doi:10.1016/S1006-706X(06)60047-2
- STUKALO, V. A. 1987: Actividad termodinámica de los fundentes del sistema MnO- SiO₂. *Avtomaticheskaya Sbarka* (1): 40-42.

Amado Cruz-Crespoacruz@uclv.edu.cu

Profesor Auxiliar e Investigador Auxiliar. Doctor en Ciencias Técnicas. Centro de Investigaciones de Soldadura, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Villa Clara, Cuba.

Rafael Quintana-Puchol

Investigador Titular. Doctor en Ciencias Técnicas. Centro de Investigaciones de Soldadura, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Villa Clara, Cuba

Lorenzo Perdomo-González.

Investigador Titular. Doctor en Ciencias Técnicas. Centro de Investigaciones de Soldadura, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Villa Clara, Cuba

Carlos R. Gómez-Pérez.

Profesor Auxiliar. Doctor en Ciencias Técnicas. Centro de Investigaciones de Soldadura, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Villa Clara, Cuba

Eduardo Díaz-Cedrécedre@uclv.edu.cu

Profesor Auxiliar. Doctor en Ciencias Técnicas. Centro de Investigaciones de Soldadura, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Villa Clara, Cuba

Jorge García-Jacomino.

Profesor Auxiliar. Doctor en Ciencias Técnicas. Centro de Investigaciones de Soldadura, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Villa Clara, Cuba

Félix A. Morales-Rodríguezfmorales@ismm.edu.cu

Profesor Asistente Doctor en Ciencias Técnicas. Departamento de Ingeniería Mecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba.